지능형 전력망(스마트 그리드) 적용을 통한 에너지 절감 및 CO₂ 감축 효과 분석

Analysis of Energy Savings and CO₂ Emission Reductions via Application of Smart Grid System

박수환 · 한상준 · 위정호[†]

Soo-Hwan Park · Sang-Jun Han · Jung-Ho Wee[†]

가톨릭대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, The Catholic University of Korea

(Received January 25, 2017; Revised March 8, 2017; Accepted April 11, 2017)

Abstract : The energy savings and CO₂ emission reductions obtainable from the situation that the Smart Grid system (SGs) is assumed to be applied in Korea up to 2030 is quantitatively analyzed with many reported data. For calculation, SGs is divided into five sectors such as Smart Transmission and Distribution (ST&D), Smart Consumer (SC), Smart Electricity Service (SES), Smart Renewable Energy (SRE) and Smart Transportation (ST). Total annual energy savings in 2030 is estimated to be approximately 103,121 GWh and this is 13.1% of total electricity consumption outlook. Based on this value, total amount of reducible CO₂ emissions is calculated to 55.38 million tCO₂, which is 17.6% of total nation's GHG reduction target. Although the contribution of energy saving due to SGs to total electricity consumption increases as years go by, that of CO₂ emission reduction gradually decreases. This might be because that coal fired based power generation is planned to be sharply increased and the rate of CO₂ emission reduction scheduled by nation is very fast. The contributable portion of five each sector to total CO₂ emission reductions in 2030 is estimated to be 44.37% for SC, 29.16% for SRE, 20.12% for SES, 5.11% for ST&D, and 1.24% for ST.

Key Words : Smart Grid, Carbon Dioxide Emission Reductions, Energy Savings, Greenhouse Gas Reduction Target, Power Generation

요약 : 본 논문에서는 국내 환경에서 설정된 가정 하에 지능형 전력망 기술이 지능형 송배전, 소비자, 전력서비스, 신재생 에너지 및 운송 등의 5가지 분야에 적용될 경우 2030년까지의 연도별 국내 에너지 절감 및 CO₂ 감축 효과와 그 상대적 기여도를 예측, 분석하였다. 2030년 지능형 전력망 운용에 따른 총 에너지 절감량은 103,121 GWh로 계산되며 이는 당해 소비전력량 전망치의 약 13.1%로 2025년 이후 이 비율은 약 10% 이상으로 유지될 것으로 예측되었다. 이를 토대로 계산된 2030년 CO₂ 배출 감축량은 5,538만 tCO₂로 계산되었고 이는 당해 온실가스 감축 목표량인 3억 1,500만 tCO₂에 17.6%에 해당하는 값이다. 이러한 CO₂ 배출 감축량은 에너지 절감량과는 다르게 해가 거듭될수록 전체 배출 감축량에 대한 그 비율이 감소하는데 이는 향후 온실가스 배출량의 대부분을 차지하는 석탄화력 발전량의 지속적인 증가와 국가의 목표 배출 감축 속도가 매우 빠르게 설정되었기 때문으로 판단된다. 2030년 5가지 각 분야에서의 에너지 절감 및 CO₂ 배출 감축 기여 비율은 지능형 소비자 44.37%, 신재생 에너지 29.16%, 전력서비스 20.12%, 송배전 5.11%, 운송 1.24%로 계산되고 시간에 따른 상대적 에너지 절감 속도는 지능형 소비자 분야가 가장 빠르며 신재생 에너지 및 전력서비스로 순서를 이룬다. 송배전 분야에서의 절감 속도는 송배전 손실을 향상의 한계 때문에 낮고, 전기자동차 예상 보급 대수의 증가율이 낮아 운송 부분의 절감 속도가 가장 느리므로 이에 대한 대책이 필요할 것으로 판단된다.

주제어 : 지능형 전력망, 이산화탄소 배출 감축, 에너지 절감, 온실가스 감축 목표, 전력 발전량

1. 서론

최근 지구온난화의 주요 원인인 이산화탄소(CO₂) 등의 온실가스 배출을 감축하려는 시도는 전 지구적 과제로 등장하였다.^{1,2)} 이에 따라 1992년 세계기후변화협약이 체결된 이후 2015년 파리기후변화협정에 이르기까지 전 세계는 온실가스 배출 감축을 위한 협력 및 기술 개발 등 다양한 노력을 기울이고 있다.³⁻⁵⁾

선진국만 온실가스 감축 의무가 있던 1997년 교토의정서와 달리 '파리협정'에서는 당사국 모두가 온실가스 감축 목표를 제출하고 이를 이행해야하는 합의가 이루어졌다.⁶⁾ 특히, 2016년 9월 세계 최대 온실가스 배출국인 미국과 중국이 파리기후변화협정을 비준하면서 파리협정은 구속력 있

는 국제조약으로 가기 위한 동력이 마련되었고 전 세계가 적극 동참해야 하는 상황이 되었다.⁷⁾ 우리나라도 2016년 11월 4일 협정 발효에 앞서 국회 본회의에서 협정 비준 동의안이 통과되면서 현실적으로 온실가스 감축에 적극 동참하게 되었다.

우리나라는 파리당사국 총회를 앞두고 2015년 6월 전 분야에서 2030년 배출전망치(BAU; 8억 5,060만 tCO₂) 대비 37%인 약 3억 1,500만 tCO₂의 감축 계획을 수립하였다. 이는 녹색기후기금 사무국 유치 등 그간 쌓아온 국제적 위상을 고려하여 2020년까지 BAU 대비 30%이었던 기존의 감축 목표보다 강화된 것이다.⁸⁾

이와 같은 온실가스 감축 목표 달성을 위해 다양한 방법들이 제시, 실행되고 있는데, 그 중 전력, 통신, 가정, 건물,

[†] Corresponding author E-mail: jhwee@catholic.ac.kr Tel: 02-2164-4866 Fax: 02-2164-4765

신재생 에너지 및 자동차 산업과 연계되어 에너지 이용 효율 향상에 따른 에너지 절감과 더불어 온실가스 감축 효과를 기대할 수 있는 지능형 전력망(스마트 그리드) 산업의 활성화가 추진되고 있다. 미국 전력연구소(Electric Power Research Institute, EPRI)의 2008년 보고서에 따르면 지능형 전력망 확산에 의해 2030년 최대 203,000 GWh의 에너지가 저감되고, 온실가스 배출량은 2억 1,100만 tCO₂ 만큼 감축이 가능할 것으로 보고하였다.⁹⁾ 이 외에도 2010년 북서태평양국립연구소(Pacific Northwest National Laboratory)는 좀 더 세분화된 분석을 통해 2030년 1,322,000 GWh의 에너지 절감 및 5억 900만 tCO₂의 감축 효과가 발생할 것으로 전망하였다.¹⁰⁾ 그러나 미국의 지능형 전력망 산업은 기술 수준과 사회적 상황 등 여러 가지 측면에서 우리나라와 다른 상황으로 국내 실정에 맞는 분석 연구가 필요하다.

우리나라는 녹색성장위원회의 1차 보고(2009년 2월)에서 국가단위의 지능형 전력망 구축 비전을 발표하였다.¹¹⁾ 또한 G8 확대정상회의에서 우리나라가 ‘지능형 전력망 선도국’으로 지정되면서(2009년 7월), 세계 최대 규모인 제주도 실증단지 구축사업이 시작(2009년 12월), 2013년 5월 종료되면서 이를 통해 153개의 관련 기술 검증 및 광범위한 9개의 비즈니스 모델을 발굴하는 등의 성과를 거두었다.^{12,13)} 이 과정에서 정부는 2010년 지능형 전력망 국가로드맵을 제시하였고 이를 기반으로 2030년까지 3단계에 걸쳐 5대 핵심 분야에 27.5조 원을 투입하여 지능형 전력망 구축에 대한 세부 계획을 수립하였다. 로드맵에 따르면 지능형 전력망 구축에 따라 2030년까지 총 2억 3천만 톤의 온실가스 감축 효과가 발생할 것으로 추정되었다.¹⁴⁾

그러나 이 로드맵에서는 추진 분야별 기대효과를 제시해 놓았으나 관련 세부 기술에 따른 좀 더 명확하고 구체적인 기대효과는 제시되어 있지 않다. 또한 지능형 전력망 구축 초기, 에너지경제연구원에서 EPRI의 자료를 토대로 작성한 지능형 전력망의 에너지 절감 및 온실가스 감축 효과에 대한 정량적 연구 자료가 존재하나,¹⁵⁾ 이 역시 우리나라의 환경 여건이 충분히 반영되지 않았다고 판단된다.

본격적으로 계획된 지능형 전력망의 구축 시나리오 상 초, 중간시점에 해당하는 현 상황에서 지능형 전력망에 의한 환경 및 에너지 측면 효과를 상세히 분석하는 체계적인 연구는 중장기적으로 에너지 절감 및 온실가스 배출 감축에 기여할 수 있는 매우 중요한 의미를 갖는다. 따라서 본 논문에서는 발표된 관련 공식 자료와 새로운 가정 하에서 지능형 전력망의 5가지 부문 및 그 세부 기술 적용에 따른 에너지 절감 및 CO₂ 감축 효과를 2030년까지 정량적으로 분석하였고, 이를 토대로 전 지능형 전력망 시스템 운용이 국내 전체 소비전력과 온실가스 배출 감축에 미칠 기여도를 분석하였다. 또한 이에 앞서 연간 에너지원별 발전량의 비중이 변함에 따라 연도별 전력부문 CO₂ 배출계수를 새롭게 예측하여 이 값을 CO₂ 감축 효과를 계산하는데 사용하였다. 따라서 본 연구를 통해 지능형 전력망에 대한 관심을 고조시키고 국가의 효율적인 에너지 수급 계획과 중장기적인

온실가스 감축 정책을 수립하는데 도움이 되고자 하였다.

2. 지능형 전력망 개요

2.1. 지능형 전력망의 정의 및 특성

지능형 전력망에 대한 정의는 국가 기관별로 다소 차이가 있는데, 국내에서는 관련 국가로드맵에 따라 기존의 전력망에 정보통신기술을 접목하여 공급자와 소비자가 양방향으로 실시간 전력 정보를 교환함으로써 에너지 효율을 최적화하는 차세대 전력망을 의미한다.¹⁴⁾

이처럼 지능형 전력망은 기존 전력망과는 다른 몇 가지 특성을 지니고 있다. 우선, 전력 공급자와 소비자 간에 양방향 커뮤니케이션을 가능케 함으로써 망 운영에 대한 소비자들의 적극적 참여를 가능하게 한다.¹⁵⁾ 또한, 지능형 전력망은 기존의 중앙 집중화된 대규모 발전 방식뿐만 아니라 신재생 에너지 등을 통한 분산 발전과의 연계가 가능하며 지능화된 시스템을 통한 자가복구(Self-healing) 등을 통해 보다 고품질의 전력을 제공하여 신뢰성을 확보하고 에너지 운영 효율을 증대시킬 수 있다.¹⁶⁾

따라서 이러한 지능형 전력망은 전력, 통신, 건축, 가전기기, 전력서비스, 신재생 에너지, 전기자동차(Electric Vehicle, EV) 및 전기기관차(Electric Locomotive, EL) 분야 등 다양한 산업과 연계되어 운용됨으로써 효과를 극대화할 수 있다. 이에 따라 정부는 지능형 전력망과 연계될 이러한 국내 산업들을 지능형 송배전(Smart Transmission and Distribution, ST&D), 지능형 소비자(Smart Consumer, SC), 지능형 전력서비스(Smart Electricity Service, SES), 지능형 신재생 에너지(Smart Renewable Energy, SRE) 그리고 지능형 운송(Smart Transportation, ST) 등 5대 분야로 체계화하여 각 분야에서 추진될 시나리오를 만들어 지능형 전력망 구축을 단계별로 진행하고 있다.¹⁴⁾ 본 논문에서는 이 5대 분야를 지능형 전력망의 특성을 대표적으로 나타낼 수 있는 ‘지능형 전력서비스’를 중심으로 Fig. 1에 표시하였다.

Fig. 1. Concept of Smart Grid and its five sectors divided for calculation.

2.2. 지능형 전력망 5대 분야

2.2.1. 지능형 송배전 분야; 전력기기 및 전력통신망의 기술 분야

이 분야에서는 전력망 고장을 사전에 예측하고 자동복구 등의 체제를 통해 전력 송배전시스템을 개선하여 에너지 효율이 향상될 것으로 기대된다. 즉, 송배전 과정에서 전력 손실이 줄어드는 만큼 발전단에서 송전량이 절약되고 이를 통해 발전량 자체가 감소될 수 있다.^{14,15)} 본 논문에서는 이 분야를 “지능형 송배전”으로 통일하여 기술하였으며, 결국 발전량이 감소한 만큼 지능형 송배전 분야에서 CO₂ 배출량 감축 및 에너지 절감 효과가 발생한다.

2.2.2. 지능형 소비자 분야

이 분야에서의 효과는 주로 가정, 상업, 산업 부문에서 각 소비자가 사용하는 전력 정보를 수집하고 종합적 제어를 가능하게 하는 양방향 통신네트워크 기술인 양방향 검침 인프라(Advanced Metering Infrastructure, AMI)와 에너지관리시스템(Energy Management System, EMS)을 통해 구현된다.

AMI는 지능형 전력망 실현에 있어 핵심 장비로, 전력 공급을 측정하는 기기와 에너지 사용 정보를 수집, 분석하는 정보통신 설비로 이루어진다.¹⁷⁾ 즉, AMI는 분석 정보를 전력회사에 제공하는 스마트미터 및 가정 내에서 이와 연계하여 소비자의 전력 사용 정보, 실시간 전기요금, 통계정보 및 다양한 부가서비스를 제공하는 에너지정보표시장치(In-Home Display, IHD)로 구성되며,^{18,19)} 이를 통해 에너지 사용량 및 비용을 줄일 수 있다.²⁰⁾ EMS는 대규모 전력계통 제어 시스템으로, 각 단말기에 위치한 스마트 기기 및 에어컨, 보일러 등, 제품들의 에너지 사용 정보를 전송받아 사용자의 개입 없이 자동으로 기기를 제어하고 사용량을 예측하는 역할을 수행한다.^{21,22)} 또한, IHD와 연계하여 소비자에게 전력 사용 정보를 제공하는데 이러한 EMS는 가정용 에너지관리시스템(Home EMS, HEMS), 빌딩 에너지관리시스템(Building EMS, BEMS), 공장 에너지관리시스템(Factory EMS, FEMS)을 통해 가정, 빌딩, 공장 등의 건물에서 에너지 운영을 최적으로 제어하여 에너지 절감을 가능케 한다.¹⁷⁾

2.2.3. 지능형 전력서비스 분야

이 분야는 수요반응(Demand Response, DR), 실시간 요금제 및 전력거래 기술 등을 포함하며 이를 통한 다양한 요금상품과 전기요금제도에 의해 에너지 절감이 가능하다.¹⁴⁾ DR은 실시간 요금제를 통해 소비자가 자발적으로 에너지 시장에 참여하는 기술로써 효율적인 전력 소비를 유도할 수 있다. 이를 통해 최대전력 사용시간이 분산되면서 발전소를 부가적으로 가동하거나 외부로부터 전력을 수입할 필요가 없어진다.²³⁾ 그러나 이는 기본적으로 전력 소비자와 공급자 간 양방향 커뮤니케이션을 통해 이루어지므로 앞서 언급된 AMI와 밀접한 연관이 있다. 따라서 이 분야와 지능형 소비자 기술의 경계가 명확하지 않을 수 있음을 감안하여 본 논문에서는 새로운 범위를 설정하였고 이와 관련

한 상세한 내용은 계산 방법 및 가정 부분에서 언급하였다. 지능형 전력망 적용에 의해 최대전력수요 감소가 일어나며 이러한 감소 자체에 따른 에너지 절감 효과도 이 분야의 효과에 포함하였다. 또한 지능형 전력서비스 분야에서는 건물주의 요구에 따라 상업용 건물이 설계, 시공 및 유지 관리되고 있음을 검증하고 문서화하는 과정인 커미셔닝을 그 효과로 추가하였다.¹⁵⁾ 이러한 이유는 건물 커미셔닝에 의해 전반적인 건축 공정에서 낭비되는 에너지를 최소화하여 에너지 효율이 높아질 것으로 판단되고 또한 지능형 전력망 관련 기기의 보급을 통해 커미셔닝에 대한 인식이 증가하여 그 효과가 증대될 것으로 기대되기 때문이다.

2.2.4. 지능형 신재생 에너지 분야

이 분야에서는 에너지 저장 기술을 포함한 풍력, 태양광, 열병합 발전 등의 신재생 에너지를 지능형 전력망에 연계하여 독립형 또는 계통 연계형으로 통합 운용함으로써 간헐적이고 출력제어가 어려운 신재생 발전원의 단점을 극복할 수 있다.^{14,18)} 이를 통해 기존 계획된 발전소 건설을 줄일 수 있고 소비자가 전력생산에도 참여할 수 있는 에너지 프로슈머로의 전환 효과도 기대할 수 있다.^{15,17)} 또한 신재생 에너지원과 같은 분산전원의 보급이 확대됨에 따라 기존의 광역 전력망으로부터 독립되어 소규모 지역에서 전력을 자급자족할 수 있는 마이크로그리드 구축이 가능함으로써 보다 안정적이고 효율적인 전력 운용이 가능하며 이러한 상황 등을 통해 에너지 절감이 가능하다.^{24,25)}

2.2.5. 지능형 운송 분야

이 분야에서는 우선 외부전력을 이용해 배터리를 충전할 수 있는 플러그인전기자동차(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV) 또는 EV와 지능형 전력망 기술을 연계함으로써 EV의 보급이 확대되고 이에 따라 기존 내연기관 승용차의 감소 효과가 나타난다.^{15,17)} 즉, 심야전기 같은 저렴한 잉여전력을 EV에 충전하여 이동에 필요한 에너지를 얻고 전기요금이 비싼 피크 시간대에 주행하는 특성을 통해 그 효과가 발생한다. 이는 전력망과 EV가 양방향으로 접속함으로써 가능하며 이를 통해 발전 수요가 감소되어 전력생산에서 발생하는 CO₂ 배출을 최소화할 수 있다.^{17,26)}

지능형 운송 분야에서는 EV 외에도 EL과 지능형 전력망의 연계를 고려할 수 있다. 각 지자체의 도시철도 운영기관을 모두 포함하여 철도전력은 한국전력공사(한전) 전력 판매량의 약 1% 이상을 차지함에도 불구하고 국내 지능형 전력망 사업은 AMI, EMS, 신재생 에너지, EV 등의 분야에만 집중되어 개발되고 있는 상황이다.²⁷⁾ 그러나 EV와 같은 논리로 철도전력 분야도 지능형 전력망과의 연계를 통해 에너지 효율 향상에 기여할 수 있다. 또한 기관차와 전력망의 양방향 통신, ESS 장치 장착을 통해 열차 운행패턴이 최적화되어 최대전력수요를 관리하는 기술도 에너지 소비 감소에 기여할 수 있다.²⁸⁾ 따라서 본 논문에서는 이 분야에 철도전력과 지능형 전력망의 연계를 통한 에너지 절감 효과를 추가하였다.

3. 계산 방법 및 가정

본 논문에서는 지능형 전력망에 의한 총 에너지 절감 및 CO₂ 감축 효과를 정량적으로 분석하기 위해 앞서 언급한 지능형 전력망 5대 분야의 개별적 분석을 진행하였다. 각 분야에서 제시한 상세한 기술을 바탕으로 계산하였고 이 외에 미국 EPRI의 지능형 전력망 효과에 대한 보고서를 참고하여 추가적인 계산을 반영하였다.⁹⁾

지능형 전력망에 의한 CO₂ 감축 효과는 각 분야에서 계산된 연간 에너지 절감량에 다음 장에서 새롭게 계산한 연도별 전력부문 CO₂ 배출계수를 새롭게 곱하여 산출하였다.

3.1. CO₂ 배출계수 분석

지능형 전력망 적용에 따른 연도별 에너지 절감 및 CO₂ 감축 효과를 정량적으로 분석하기에 앞서 연간 에너지원별 발전량의 비중이 변하면 CO₂ 배출 계수도 변할 것으로 판단되어 연도에 따라 변화하는 전력부문 CO₂ 배출계수 값 계산을 개별적으로 수행하여 그 값을 예측하였다.

한국전력거래소 통계에 따르면 2010년, 2011년 전력부문 평균 CO₂ 배출계수는 각각 0.461, 0.450 tCO₂/MWh이다.²⁹⁾ 전력 분야에서 배출되는 온실가스 대부분이 CO₂라는 점을 감안하면 온실가스 배출계수는 평균 탄소 배출계수로 대체

될 수 있으며, 이는 식 (1)과 같이 각 에너지원별 평균 탄소 배출계수에 연간 총 발전량 대비 각 에너지원별로 생산된 연간 전력량(MWh) 비율을 곱한 후 이들의 합으로 계산할 수 있다.³⁰⁾

$$CEC_{ave} = \sum \{CEC_i \times (AEG_i / AEG_{tot})\} \quad (1)$$

CEC(Carbon Emission Coefficient); 에너지원별 평균 CO₂ 배출계수(kgCO₂/kWh)

CEC(Carbon Emission Coefficient)_{ave}; 평균 CO₂ 배출계수 (tCO₂/MWh)

AEG(Annual Electricity Generation)_{tot}; 연간 총 발전량 (GWh)

AEG(Annual Electricity Generation); 에너지원별 연간 발전량(GWh)

i: Hydro, Coal, Petroleum, Natural Gas (NG), Nuclear, Alternative energy

2010년부터 2015년까지의 에너지원별 연간 발전량은 에너지통계연보를 참고하였고,³¹⁾ 2016년 이후 에너지원별 발전량 전망은 최근 10년간의 발전량 추세를 2030년까지 확장하여 2030년 804,123 GWh에 이를 것으로 예측되었으며 이들을 Table 1에 관련 값과 함께 정리하였다.

Table 1. Korea's annual electricity generation according to energy source and nation's CO₂ emission coefficient, 2010-2015; historical, 2016-2030; estimated values

Year	Electricity generation (GWh)												Nation's CO ₂ emission coefficient (tCO ₂ /MWh)
	Hydro	(%)	Coal	(%)	Petroleum	(%)	NG ^{a)}	(%)	Nuclear	(%)	Alternative energy	(%)	Total
2010	6,472	1.4	197,916	41.7	12,878	2.7	104,814	22.1	148,596	31.3	3,984	0.8	474,660
2011	7,831	1.6	200,124	40.3	12,492	2.5	114,131	23.0	154,723	31.1	7,592	1.5	496,893
2012	7,652	1.5	198,831	39.0	15,156	3.0	127,045	24.9	150,327	29.5	10,563	2.1	509,574
2013	8,543	1.7	200,444	38.8	15,753	3.0	142,357	27.5	138,784	26.8	11,267	2.2	517,148
2014	7,820	1.5	203,446	39.0	24,949	4.8	114,654	22.0	156,407	30.0	14,695	2.8	521,971
2015	5,796	1.1	207,333	39.3	24,292	4.6	108,590	20.6	164,762	31.2	17,318	3.3	528,091
2016	8,152	1.5	221,472	39.6	21,562	3.9	132,240	23.6	157,560	28.1	18,920	3.4	559,906
2017	8,437	1.5	228,189	39.5	22,459	3.9	138,630	24.0	158,720	27.5	20,915	3.6	577,350
2018	8,721	1.5	234,906	39.5	23,357	3.9	145,020	24.4	159,880	26.9	22,910	3.9	594,794
2019	9,006	1.5	241,623	39.5	24,254	4.0	151,410	24.7	161,040	26.3	24,905	4.1	612,238
2020	9,290	1.5	248,340	39.4	25,152	4.0	157,800	25.1	162,200	25.8	26,900	4.3	629,682
2021	9,575	1.5	255,057	39.4	26,050	4.0	164,190	25.4	163,360	25.2	28,895	4.5	647,126
2022	9,859	1.5	261,774	39.4	26,947	4.1	170,580	25.7	164,520	24.8	30,890	4.6	664,570
2023	10,144	1.5	268,491	39.4	27,845	4.1	176,970	25.9	165,680	24.3	32,885	4.8	682,014
2024	10,428	1.5	275,208	39.3	28,742	4.1	183,360	26.2	166,840	23.9	34,880	5.0	699,458
2025	10,713	1.5	281,925	39.3	29,640	4.1	189,750	26.5	168,000	23.4	36,875	5.1	716,903
2026	10,997	1.5	288,642	39.3	30,538	4.2	196,140	26.7	169,160	23.0	38,870	5.3	734,347
2027	11,282	1.5	295,359	39.3	31,435	4.2	202,530	26.9	170,320	22.7	40,865	5.4	751,791
2028	11,566	1.5	302,076	39.3	32,333	4.2	208,920	27.2	171,480	22.3	42,860	5.6	769,235
2029	11,851	1.5	308,793	39.3	33,230	4.2	215,310	27.4	172,640	21.9	44,855	5.7	786,679
2030	12,135	1.5	315,510	39.2	34,128	4.2	221,700	27.6	173,800	21.6	46,850	5.8	804,123

^{a)} Includes district energy.

Table 2. Individual CO₂ emission coefficient according to energy source

	CO ₂ emission coefficient (kgCO ₂ /kWh)					
	Hydro	Coal	Petroleum	NG	Nuclear	Alternative energy
KEPCO	-	0.860	0.689	0.460	0.009	-
IAEA	0.008	0.991	0.782	0.549	0.010	0.047
Average	0.004	0.926	0.736	0.505	0.010	0.024

한전과 IAEA 에너지원별 CO₂ 배출계수를 Table 2에 나타내었다.³⁰⁾

한전의 CO₂ 배출계수는 연료의 연소에 의한 배출을 바탕으로 계산하여 발전소의 건설, 운영 및 폐기 시까지 전주기의 특성이 반영되지 않은 반면 IAEA 자료는 이 값이 반영된 것으로,³²⁾ 본 논문에서는 두 기관의 평균값을 계산에 적용하였다. 또한 한전자료에서 제시되지 않은 수력과 대체 에너지에 대한 CO₂ 배출계수는 0으로 가정하여 평균값을 설정하였다. 이와 같이 계산된 에너지원별 CO₂ 배출 계수는 상수로 가정하였고 2016년 이후 전력부문 CO₂ 배출계수를 구하기 위한 계산에 적용하였다.

3.2. 지능형 송배전 분야

지능형 송배전 기술 적용에 의한 에너지 절감 효과는 기술 적용 전 송배전 손실률과 적용 후 손실률 감소에 따른 차이를 구한 후 소내전력률을 고려하여 구할 수 있다. 즉, 기술 적용 전 및 적용 후 연간 송전단 발전전력량은 식 (2)와 (3)으로 표시할 수 있다.

$$ANEG_b = AEC / (1-TDLF_b) \quad (2)$$

$$ANEG_a = AEC / (1-TDLF_a) \quad (3)$$

ANEG(Annual Net Electricity Generation)_{b, a}; 기술 적용 전·후 연간 송전단 발전전력량(GWh)

AEC(Annual Electricity Consumption); 연간 소비전력량 (GWh)

TDLF(Transmission & Distribution Loss Factor)_{b, a}; 적용 전·후 송배전 손실률(%)

두 식의 차이로부터 절감 가능한 연간 순 송전단 발전 절감량을 식 (4)로 나타낼 수 있으며 여기에 소내 손실률인 전력률을 고려하면 지능형 송배전 적용에 따른 연간 총 송전단 발전 절감량은 식 (5)로 표시할 수 있다.¹⁵⁾

$$ANEGS = ANEG_b - ANEG_a \quad (4)$$

$$AGEGS = ANEGS / (1-AUF) \quad (5)$$

ANEGS(Annual Net Electricity Generation Savings); 연간 순 송전단 발전 절감량(GWh)

AGEGS(Annual gross Electricity Generation Savings); 연간 총 송전단 발전 절감량(GWh)

AUF(Auxiliary Use Factor); 소내전력률(%)

2010년부터 2015년 사이, 각 식에 적용된 연간 소비전력량, 송배전 손실률 및 소내전력률은 기본적으로 한국전력통계 자료를 참고하였고,³³⁾ 2016년부터 2029년까지의 소비전력량은 제7차 전력수급기본계획 전망 자료를 사용하였다.³⁴⁾ 2030년 소비전력량은 2010년부터 2029년까지의 자료를 최소자승법을 통해 추세하여 787,700 GWh로 가정하였다.

최근 10년간의 한국전력통계를 분석한 결과, 국내 송배전 손실률은 기술적 노력을 통해 지속적으로 감소하여 지능형 전력망을 적용하지 않을 경우에도 2014년 3.69%, 2015년 3.6%로 현재 세계 최고 수준으로 알려져 있다.^{33,35)} 이는 2014년 기준 일본, 프랑스, 미국, 영국의 송배전 손실률이 각각 5.0%, 7.4%, 6.6%, 8.5%인 것과 비교하여도 매우 높은 수준이다.³⁵⁾ 따라서 현재 손실률 값 3.6%를 지능형 송배전 기술 적용 전 값으로 가정하여 2030년도까지 동일하게 설정하였다. 반면, 지능형 송배전 적용 후 손실률은 지능형 전력망 로드맵에서 제시된,¹⁴⁾ 2020년까지 3.4%, 2030년까지 3.0% 목표 값을 설정한 후 2016년도 값과 내삽한 뒤 추세하여 2030년까지 일정 비율로 감소하는 것으로 가정하였다. 그러나 2010년부터 2015년까지는 지능형 송배전 적용을 통한 손실률 개선은 공식적인 자료가 없기 때문에 효과가 없었던 것으로 가정하였다.

Table 3. Assumed data used to calculate energy savings in Smart Transmission and Distribution (ST&D)

Year	Electricity consumption (GWh)	T&D loss factor (%)			Auxiliary use factor in power plant (%)
		Traditional	Smart grid	Difference	
2010	434,160	3.99	3.99	0	4.20
2011	455,070	3.69	3.69	0	4.14
2012	466,593	3.57	3.57	0	3.96
2013	474,849	3.73	3.73	0	3.96
2014	477,592	3.69	3.69	0	3.88
2015	483,655	3.60	3.60	0	4.50
2016	520,900	3.60	3.56	0.04	4.10
2017	546,810	3.60	3.52	0.08	4.09
2018	573,240	3.60	3.48	0.12	4.08
2019	596,950	3.60	3.44	0.16	4.07
2020	617,769	3.60	3.40	0.20	4.06
2021	637,040	3.60	3.36	0.24	4.05
2022	654,998	3.60	3.32	0.28	4.05
2023	671,936	3.60	3.28	0.32	4.04
2024	688,429	3.60	3.24	0.36	4.03
2025	704,934	3.60	3.20	0.40	4.02
2026	720,633	3.60	3.16	0.44	4.01
2027	735,990	3.60	3.12	0.48	4.00
2028	751,135	3.60	3.08	0.52	3.99
2029	766,109	3.60	3.04	0.56	3.98
2030	787,700	3.60	3.00	0.60	3.97

한국전력통계에 제시된 용어 정리에 의하면³³⁾ 2005년까지 송전단 전력량의 정의는 발전소에서 생산된 전력량에서 발전소 내 소비전력량을 제외한 값으로 ‘순 발전량’을 의미하나 2006년 이후 시장 구입량, 전력수급계약 그리고 도서 발전 송전량을 합한 수치를 의미하는 것으로 그 정의가 변경되었다. 그러나 본 논문에서 송전단 전력량의 의미는 에너지 절감 효과의 정량적인 분석을 용이하게 하고자 전자의 의미를 적용하였다.

소내전력률은 2006년부터 2015년까지 값³³⁾을 추세하여 2030년까지 값을 예측, 그 결과 2030년 3.97%에 이를 것으로 가정하였다. 이와 같이 지능형 송배전 기술 적용에 따른 에너지 절감 및 CO₂ 배출 감소량 계산을 위해 가정된 자료를 Table 3에 자세히 표시하였다.

3.3. 지능형 소비자 분야

지능형 소비자 분야에서는 AMI, BEMS, FEMS 기술 적용을 통해서만 에너지 절감 효과가 나타난다고 전제하였다. HEMS 기술을 포함하지 않은 이유는 EMS의 높은 구축비용으로 인해 일부 대형 빌딩과 공장, 기업들 중심으로 BEMS, FEMS 시장이 형성되고, 상대적으로 HEMS의 비중은 미약하기 때문이다.²¹⁾ 뿐만 아니라 국내 일반인의 생활은 주로 아파트 같은 집단 거주 형태를 이루고 있어 HEMS의 운용 효율성이 낮고 AMI에 의한 에너지 절감 효과 계산 과정에 HEMS의 효과가 어느 정도 반영됐다고 판단했기 때문이다. 지능형 소비자에 의한 연간 에너지 절감 효과는 가정용, 상업용 및 산업용 분야의 연간 소비전력량에 각 AMI, BEMS 및 FEMS 기술 적용을 통한 에너지 절감 가능률과 전망 기간 중 각 기술의 시장 보급률을 곱한 것으로 식 (6)과 같이 계산된다.

$$AES_{SC} = AEC_i \times PR_i \times ESR_t \quad (6)$$

AES_{SC}(Annual Energy Savings); 연간 에너지 절감량(GWh)

PR(Penetration Rate); 기술별 시장 보급률(%)

ESR(Energy Saving Rate); 기술별 에너지 절감 가능률(%)

i; 가정용+상업용+산업용, 상업용, 산업용

t; AMI, BEMS, FEMS

본 식은 EPRI가 지능형 소비자 기술 적용을 통한 에너지 절감 효과를 계산하기 위해 제시한 식⁹⁾을 재구성한 것이다. AMI 기술 적용 계산에서 사용된 소비전력량은 가정용, 상업용, 산업용을 모두 합한 것이며 이 중 상업용 값은 한국전력통계를 참고하여³³⁾ 일반용과 교육용에서 소비된 전력량을 합하였다. 한편, BEMS와 FEMS는 계산에서 각각 상업용과 산업용 소비전력량을 적용하였다.

AMI 적용에 의한 효과 분석을 위해 이미 발표된 스마트 미터(스마트 전력량계)의 통계를 응용하였다. 전국 일반 전력량계는 한전 소유의 2,194만호에 기타 소유의 아파트 745만호, 빌딩 300만호로 총 약 3,200여 만호에 설치되어 있고, 한전의 주도로 2010년부터 스마트미터로 교체되고 있다.³⁶⁾

따라서 최종 목표 교체율은 한전 계량계 호수인 2194호(전체 69%)로 가정하였다. 최근 AMI(또는 스마트미터)는 2010년 50만호가 보급된 이후 2012년까지 79.5만호, 2013년까지 누적 총 200만호가 보급될 예정이었으나 여러 가지 기술적 행정적 문제로 목표에 도달하지 못했다.³⁷⁾ 그러나 최근 지능형 전력망에 대한 중요성이 다시 대두되면서 최근 2022년까지 AMI 보급을 완료한다는 자료가 발표되었다.³⁸⁾ 따라서 본 논문에서는 기존 스마트미터의 보급 현황과 보급 완료 목표를 고려하여 재구성된 AMI 보급률을 예측, 적용하여 계산에 사용하였다.

BEMS와 FEMS의 보급률은 2011년부터 정부가 ‘IT기반 ESCO 시범사업’을 통해 EMS 보급 사업을 시행했기 때문에²¹⁾ 2012년까지의 값을 0으로 가정하였고 2013년부터 계산에 적용하였다. 2013년도 시장 보급률은 정보통신산업진흥원에서 발표한 보고서³⁹⁾를 참조하여 BEMS와 FEMS 각각 2.97%, 1.93%로 계산에 적용하였다. 또한 시장 예측 자료⁴⁰⁾에 따르면 BEMS 국내 시장은 2013년 494억 원에서 2017년 2,184억 원, 2020년 3,790억 원으로 분석되고, FEMS 국내 시장은 2013년 2,096억 원에서 2017년 6,351억 원, 2020년 1조 1,152억 원으로 예상된다는 것을 근거로 2014년 이후 보급률은 시장 규모와 비례하여 증가하는 것으로 가정하였다. 이와 같이 계산에 필요한 용도별 소비전력량과 각 기술의 보급률을 연도별로 정리하여 Table 4에 요약하였다.

Table 4. Assumed data used to calculate energy savings in Smart Consumer (SC)

Year	Electricity consumption (GWh)				Penetration rate (%)		
	Residential	Commercial ^{a)}	Industrial	Total	AMI	BEMS	FEMS
2010	63,200	104,863	232,672	400,735	2.3	0	0
2011	63,524	107,072	251,491	422,087	3.0	0	0
2012	65,484	109,453	258,102	433,039	3.6	0	0
2013	65,815	110,143	265,373	441,331	6.4	2.97	1.93
2014	64,457	108,199	272,552	445,208	9.1	4.53	2.90
2015	65,619	111,370	273,548	450,537	10.5	7.30	3.87
2016	67,808	119,760	288,240	475,808	11.4	10.08	4.83
2017	69,171	122,995	299,380	491,546	26.2	13.12	5.86
2018	70,534	126,230	310,520	507,284	40.9	16.15	7.24
2019	71,897	129,465	321,660	523,022	55.7	19.19	8.77
2020	73,260	132,700	332,800	538,760	70.5	22.76	10.29
2021	74,623	135,935	343,940	554,498	85.2	24.35	11.76
2022	75,986	139,170	355,080	570,236	100.0	27.23	12.94
2023	77,349	142,405	366,220	585,974	100.0	30.10	14.12
2024	78,712	145,640	377,360	601,712	100.0	32.98	15.30
2025	80,075	148,875	388,500	617,450	100.0	35.85	16.47
2026	81,438	152,110	399,640	633,188	100.0	38.72	17.65
2027	82,801	155,345	410,780	648,926	100.0	41.60	18.83
2028	84,164	158,580	421,920	664,664	100.0	44.47	20.01
2029	85,527	161,815	433,060	680,402	100.0	47.35	21.19
2030	86,890	165,050	444,200	696,140	100.0	50.22	22.37

^{a)} Electricity consumption of commercial includes that of public & service and educational parts

지능형 소비자 분야에서 AMI, BEMS, FEMS 각각의 에너지 절감 가능률의 연도별 변화량을 예측하는 것은 어려울 것으로 판단되어 동일할 것으로 가정하였다. 즉, 산업통상자원부의 조사 결과³⁶⁾를 참조하여 AMI 보급을 통해 약 3.7%, BEMS와 FEMS의 경우 에너지경제연구원은 연구 보고서²¹⁾를 참조하여 각각 15.5%, 7.2%로 계산에 적용하였다.

3.4. 지능형 전력서비스 분야

지능형 전력서비스 분야에서는 지능형 소비자 분야와 그 적용 범위를 구분하고자 DR 기술은 전력 소비자와 공급자 간 직접적인 피드백을 통해 정보를 공유하면서, 공급자는 전력 공급량을 탄력적으로 조절하고 소비자는 전력 소비를 최소화함으로써 그 효과가 발생하는 것으로 인식하였다. 즉, DR 기술은 AMI와 연계되어 하나의 유기적인 시스템으로 작용하는데, 스마트미터에 의해 전력 사용량이 측정된 후 스마트 가전기기 및 IHD를 통해 인트라적 개념인 지능형 소비자 분야와는 달리 수요자와 공급자 간에 직접적인 통신을 통해 에너지 절감 효과가 발생하는 것으로 가정하였다.

본 계산을 위해서는 앞서 지능형 소비자에서 적용한 가정용, 상업용 및 산업용 분야의 연간 소비전력량에 직접적인 피드백에 의한 에너지 절감 가능률과 전망기간 중 피드백을 가능하게 해 줄 장비 보급률을 곱한 것으로 에너지 절감량은 식 (7)로 표시할 수 있다.⁹⁾

$$AES_{DR} = AEC_i \times PR_i \times ESR_i \quad (7)$$

PR (Penetration Rate); 용도별 피드백 장비 시장 보급률(%)
ESR (Energy Saving Rate); 용도별 직접적인 피드백에 의한 에너지 절약 가능률(%)
i; 가정용, 상업용, 산업용

본 논문에서 사용된 직접적인 피드백을 가능하게 해주는 장비 보급률 자료는 EPRI 보고서⁹⁾에서 예상하는 2030년 기준 자료와 국내 인터넷망 및 IT 기술이 세계 최고 수준인 점을 감안하여 가정하였다. 즉, EPRI에서 제시한 보급률에 이르는 시점이 국내에서는 더 빠르다고 판단하였고 본 논문에서 2022년 AMI의 보급률 목표를 100%로 가정한 것을 토대로 2022년 가정용, 상업용, 산업용 각 용도별 장비의 보급률 목표의 적정 수준을 각각 50%, 75%, 75%까지 실현될 수 있을 것으로 설정하였다. 또한 2030년까지 100%로 목표 값을 설정한 후, 2022년도 이후부터는 이전 AMI의 보급률과 동일한 비율로 증가하는 것으로 가정하였다.

최대전력수요 감소로 발생하는 연간 에너지 절감 효과는 전망기간까지 예측된³⁴⁾ 연간 최대전력수요량의 저감 가능률과 이에 따른 에너지 절약 비율을 곱하여 계산하였고, 이

를 식 (8)에 나타내었다.⁹⁾

$$AES_{peak\ demand} = PD \times PDRP \times PDES R \div 1000 \quad (8)$$

PD (Peak Demand); 최대전력수요(MW)
PDRR (Peak Demand Reduction Rate); 최대전력 수요 저감 가능률(%)
PDES R (Peak Demand Energy Saving Ratio); 피크수요 저감에 대한 에너지 절약비(kWh/kW)

2010년부터 2015년 사이, 최대전력수요는 한국전력통계자료³³⁾를 참고하였으며, 2016년부터 2029년까지의 최대전력수요 전망은 제7차 전력수급기본계획 통계수치 자료³⁴⁾를 사용하였다. 2030년 최대전력수요는 2010년부터 2029년까지의 자료를 최소자승법을 통해 추세하여 132,060 MW로 가정하였다.

커미셔닝에 의한 연간 에너지 절감 효과는 상업용 건물만을 대상으로 하고 있기 때문에 상업용 분야의 연간 소비전력량에 전망기간 동안의 커미셔닝의 시장 보급률과 커미셔닝을 통한 에너지 절감 가능률을 곱하여 식 (9)을 통해 계산된다.⁹⁾

$$AES_c = AEC_i \times PR_c \times ESR_c \quad (9)$$

PR (Penetration Rate); 커미셔닝 시장 보급률(%)
ESR (Energy Saving Rate); 커미셔닝에 의한 에너지 절약 가능률(%)
i; 상업용

미국의 커미셔닝 시장 보급률은 2030년까지 5%~20%로 예측되지만⁹⁾ 국내에서 상업용 건물의 건물주는 건물을 분양하거나 임대해주는 형식으로 운영하는 경우가 많아,¹⁵⁾ 미국보다는 보수적일 가능성이 있어 가장 최솟값인 5%를 2030년 보급률로 설정한 후, 전망 기간 내에 매년 10%씩 증가하는 것으로 가정하였다.

지능형 전력서비스 분야에서 위와 같은 세 가지 기술에 의한 에너지 절감 계산에 적용되는 변수들의 연도별 변화량은 지능형 소비자 분야의 경우와 마찬가지로 정확하게 예측하는 것이 어려울 것으로 판단하였다. 따라서 EPRI의 조사⁹⁾를 참고하여 에너지 절감 가능률을 직접적인 피드백에 의한 효과 중 가정용, 상업용, 산업용 및 커미셔닝 분야에서 각각 5.0%, 2.5%, 2.5%, 9%로 고정, 적용하였다. 또한 지능형 전력망을 적용하여 발생할 수 있는 최대전력수요의 저감 가능성은 5%로 가정하였고, 최대전력 1 kW가 저감될 때 65 kWh의 에너지가 절약되는 것으로 가정하였다.

이와 같이 지능형 전력서비스 적용에 따른 에너지 절감량을 계산하기 위해 가정된 자료를 Table 5에 표시하였다.

Table 5. Assumed data used to calculate energy savings in Smart Electricity Service (SES)

Year	Penetration rate of display devices (%)			Market penetration of commissioning for commercial sector (%)	Peak power demand (MW/year)
	Residential	Commercial	Industrial		
2010	1.2	1.7	1.7	0.74	73,137
2011	1.5	2.3	2.3	0.82	73,833
2012	1.8	2.7	2.7	0.90	76,522
2013	3.2	4.8	4.8	0.99	77,295
2014	4.6	6.8	6.8	1.09	80,154
2015	5.3	7.9	7.9	1.20	83,250
2016	5.7	8.6	8.6	1.32	85,959
2017	13.1	19.7	19.7	1.45	90,214
2018	20.5	30.7	30.7	1.59	94,554
2019	27.9	41.8	41.8	1.75	98,446
2020	35.3	52.9	52.9	1.93	101,863
2021	42.6	63.9	63.9	2.12	105,452
2022	50.0	75.0	75.0	2.33	108,633
2023	56.3	78.1	78.1	2.57	111,658
2024	62.5	81.3	81.3	2.82	114,386
2025	68.8	84.4	84.4	3.10	117,115
2026	75.0	87.5	87.5	3.42	119,711
2027	81.3	90.6	90.6	3.76	122,250
2028	87.5	93.8	93.8	4.13	124,754
2029	93.8	96.9	96.9	4.55	127,229
2030	100.0	100.0	100.0	5.00	132,060

3.5. 지능형 신재생 에너지 분야

지능형 신재생 에너지 분야에서 적용 대상은 기술적, 시장적 측면에서 안정적으로 추진되고 있는 태양광 및 풍력 발전으로 제한하였다. 우선 예비 설비로 관리 가능한 양수발전이 기존의 전력망을 대변한다고 가정하고, 태양광 및 풍력 발전의 생산량이 총 양수 발전량을 채우고 난 후 추가 발전된 양에 대해서만 에너지 절감 효과가 발생하는 것으로 전제하였다. 즉, 연간 양수 발전량을 초과하는 태양광 및 풍력 발전량이 에너지 절감 효과로 이 값은 식 (10)로 계산된다.¹⁵⁾

$$AES_{SRE} = AEG_p - (AEG_{ph} + AEG_w) \quad (10)$$

p, ph, w; Pumped-storage, Photovoltaic, Wind power

2015년까지의 양수, 태양광 및 풍력에 의한 발전량은 신재생 에너지 보급 통계¹¹⁾와 한국전력통계³³⁾를 참고하였으며, 2016년 이후 자료는 제7차 전력수급기본계획³⁴⁾을 분석하여 최소자승법을 통해 2030년까지 추세, 확장하였다. 단, 양수 발전량의 경우 전력수급계획에 전망이 제시되어 있지 않기 때문에 최근 10년간 추세로 2030년까지 증가하는 것으로 가정하였다. 지능형 신재생 에너지 기술 적용에 따른 에너지 절감 및 CO₂ 배출 감소량을 계산하기 위해 사용된 자료를 Table 6에 정리하였다.

Table 6. Assumed data used to calculate energy savings in Smart Renewable Energy (SRE); amount of electricity generated by Photovoltaic, Wind power and Pumped-storage system

Year	Electricity generation (GWh)			
	Photovoltaic	Wind power	Photovoltaic and wind power	Pumped-storage
2010	773	817	1,590	2,790
2011	917	863	1,780	3,233
2012	1,103	913	2,016	3,683
2013	1,605	1,148	2,753	4,105
2014	2,556	1,146	3,702	5,068
2015	2,741	1,434	4,175	3,650
2016	3,808	2,078	5,886	4,913
2017	5,040	3,207	8,247	5,239
2018	6,152	4,464	10,616	5,564
2019	7,333	5,097	12,430	5,890
2020	8,589	6,399	14,988	6,216
2021	9,921	8,265	18,186	6,542
2022	11,323	9,280	20,603	6,868
2023	12,782	10,196	22,978	7,193
2024	14,271	11,140	25,411	7,519
2025	15,759	12,124	27,883	7,845
2026	17,210	13,160	30,370	8,171
2027	18,593	14,256	32,849	8,497
2028	19,886	15,419	35,305	8,822
2029	21,210	16,663	37,873	9,148
2030	22,019	17,526	39,545	9,474

3.6. 지능형 운송 분야

지능형 운송 적용에 의한 에너지 절감 효과는 지능형 전력망에 의해 EV 보급이 활성화되어 기존 승용자동차 사용이 줄어들고 EV를 대신 사용함으로써 야기되는 효과로 판단하였다. 따라서 본 논문에서는 EV와 기존 승용자동차의 주행거리(km) 당 소비전력량(기존 연비의 역수)을 이용해 운행 시 소요되는 에너지의 차이를 구한 후 승용자동차의 연평균 주행거리와 EV 보급 전망 대수 등을 고려하여 에너지 절감 효과를 계산하였다.

또한 본 논문에서는 EL 수요 역시 지능형 전력망에 의해 더욱 활성화될 것으로 판단하여 추가로 디젤 엔진 기반 기관차의 EL 대체에 따른 에너지 절감 효과도 자동차와 동일한 방법으로 분석하였으며, 이를 식 (11)을 이용, 계산하였다.

$$AES_{ST} = (ECPD_{ave, i} - ECPD_{ave, e}) \times ADD_i \times SO_e \quad (11)$$

ECPD (Energy Consumption Per Distance)_{ave, i}; 주행거리(km) 당 평균 소비전력량(kWh/km)

ADD (Annual Driving Distance)_{ave, i}; 기존 차량 연평균 주행거리(km/car)

SO (Supply Outlook)_e; 대체 차량의 보급 전망 대수(car)

t; 기존 승용자동차, 디젤기관차
e; EV, EL

우선, 대상 자동차의 범위는 기존 차량의 경우 가솔린 엔진 기반 승용자동차, 대체 차량의 경우 순수 EV로 한정하였다. 또한 본 과정이 에너지 절감량을 산출하는 것이므로 자동차 효율은 에너지 열량 환산기준(7,780 kcal/L, 2,300 kcal/kWh)³¹⁾을 이용하여 주행거리 당 소비전력량으로 나타내었다. 단, 승용자동차의 대부분이 휘발유를 연료로 사용하기 때문에 에너지 열량 환산인자는 휘발유를 기준으로 하였다.

대상 기관차량의 범위는 기존 기관차의 경우 디젤기관차, 대체 기관차의 경우 EL로 가정하였다. 여기서 디젤기관차와 EL은 여객을 수송하는 디젤동차와 전동차는 제외한 열차를 전인하는 동력차로 한정하였고⁴²⁾ 효율은 디젤 기준의 에너지 열량 환산인자(9,010 kcal/L, 2,300 kcal/kWh)³¹⁾를 이용하여 자동차와 동일하게 주행거리 당 소비전력량으로 나타내었다.

기존 승용자동차의 평균 주행거리 당 소비전력량은 2014년 이전 10년간의 값^{43,44)}을 추세하여 2030년까지 예측하였고, 그 결과 2030년 0.15 kWh/km에 이를 것으로 가정하였다. 한편, 2010년과 2011년 국내 EV의 평균 주행거리 당 소비전력량에 대한 공식적인 자료가 없어, 이 경우는 지능형 운송에 의한 효과는 없는 것으로 가정하였다. 2012년부터 2015년 사이, EV 평균 주행거리 당 소비전력량은 한국에너지공단 자료를 참고하였다.⁴⁴⁾

2015년 현재 EV의 평균 주행거리 당 소비전력량은 0.19 kWh/km (5.17 km/kWh)⁴⁴⁾로 알려져 있으나 현재 EV 시장은 초기 단계로 향후 EV 평균 연비 전망 자체가 무리일 수 있다. 그러나 정부의 제3차 친환경자동차 개발 및 보급 계획⁴⁵⁾에 따르면 EV 연비에 가장 큰 영향을 주는 배터리 무게당 용량이 2배 이상 향상가능하다는 자료를 근거로 본 논문에서 2020년 EV의 목표 평균 주행거리 당 소비전력량을 2015년 값의 2배인 0.1 kWh/km (10.34 km/kWh)로 가정하였다. 또한 이 목표 값과 2015년도의 값을 내삽한 뒤 추세하여 2030년까지 일정 비율로 증가하는 것으로 가정하였다.

EL은 2013년 한국철도공사 연구 보고서를⁴⁶⁾ 참고하여 노선별 전체 연비의 평균인 13.48 kWh/km (0.07 km/kWh)를 계산에 적용하였다. 그 외에 연도별 디젤기관차의 연비는 디젤자동차의 엔진보다 규모가 크므로 자동차 연비 개선속도보다 더딜 것으로 판단하여 디젤자동차 평균 연비 증가율인 연 2.83%의 50%인 연 1.42%의 비율로 개선되는 것으로 가정하였다. 한편, EL이 디젤기관차를 대체할 경우 에너지 효율이 20~30% 가량 증대되는 것으로 알려져 있어⁴⁷⁾ 본 논문에서는 EL의 에너지 효율이 디젤기관차보다 25% 높은 것으로 가정하였고, 2013년 EL의 주행거리 당 평균 소비전력량을 10.11 kWh/km (0.01 km/kWh)로 계산에 적용하였다. 또한, 연도별 EL의 평균 연비는 디젤기관차 경우와 마찬가지로 EV 평균 연비 증가율의 절반인 3.45%의 비율로 향상되는 것으로 가정하였다.

한편, 연평균 주행거리는 EV와 EL이 각각 승용자동차와

Table 7. Assumed data used to calculate energy savings in Smart Transportation (ST)

Year	Energy consumption for unit vehicle kilometer (kWh/km)						Annual driving distance (km/car) (km/locomotive)		Outlook of supply (car) (locomotive)	
	Passenger car	Electric vehicle	Difference	Diesel locomotive	Electric locomotive	Difference	Passenger car	Diesel locomotive	Electric vehicle	Electric locomotive
2010	0.26	-	-	14.06	11.23	2.84	13,469	123,273	-	179
2011	0.25	-	-	13.87	10.84	3.02	13,615	121,884	338	177
2012	0.24	0.20	0.03	13.67	10.47	3.20	13,907	136,474	1,091	204
2013	0.24	0.21	0.03	13.48	10.11	3.37	13,651	149,077	1,871	209
2014	0.23	0.21	0.03	13.29	9.76	3.53	13,724	114,993	2,946	200
2015	0.22	0.19	0.03	13.10	9.42	3.67	13,841	131,945	5,767	219
2016	0.21	0.16	0.05	12.91	9.10	3.81	13,896	133,008	10,471	225
2017	0.21	0.14	0.07	12.73	8.78	3.94	13,951	134,071	21,844	232
2018	0.20	0.12	0.08	12.55	8.48	4.07	14,006	135,134	39,886	239
2019	0.20	0.11	0.09	12.37	8.19	4.18	14,060	136,197	64,597	246
2020	0.19	0.10	0.09	12.20	7.91	4.29	14,115	137,260	95,977	253
2021	0.18	0.09	0.09	12.02	7.64	4.39	14,170	138,323	134,026	260
2022	0.18	0.09	0.09	11.85	7.37	4.48	14,225	139,386	178,744	267
2023	0.18	0.08	0.10	11.69	7.12	4.57	14,279	140,449	230,131	274
2024	0.17	0.08	0.10	11.52	6.87	4.65	14,334	141,512	288,187	281
2025	0.17	0.07	0.09	11.36	6.64	4.72	14,389	142,575	352,912	288
2026	0.16	0.07	0.09	11.20	6.41	4.79	14,444	143,638	424,306	295
2027	0.16	0.06	0.09	11.04	6.19	4.85	14,498	144,701	502,369	302
2028	0.15	0.06	0.09	10.88	5.97	4.91	14,553	145,764	587,101	309
2029	0.15	0.06	0.09	10.73	5.77	4.96	14,608	146,827	678,502	316
2030	0.15	0.06	0.09	10.58	5.57	5.01	14,663	147,890	776,572	323

디젤기관차를 대체하기 때문에 승용자동차와 디젤기관차의 연평균 주행거리와 같다고 가정하였다. 각 자료는 교통안전공단⁴⁸⁾과 한국철도공사 자료⁴⁹⁾를 참고하였는데 2015년 이후 연평균 주행거리는 2010년부터 2014년까지의 자료를 최소자승법을 통해 2030년까지 추세하여, 2030년 승용자동차와 디젤기관차 각각 14,663 km, 147,890 km로 가정하였다.

환경부는 최근 2020년까지 EV의 누적 보급 대수를 20만 대로 목표하였으나 실제 보급률은 이에 미치지 못할 것으로 예상된다.^{50,51)} 이에 따라 2015년까지의 실제 보급 추세를 2020년까지 증가되리라는 가정과 함께 기 발표된 2016~2020년 전망치를 고려하여 2020년까지 예측된 EV의 누적 보급 대수를 약 9만5천대로 예상하였다. 이러한 추세를 2030년까지 확장하여 총 누적 대수가 약 78만 대에 이를 것으로 가정하였다.

2010년부터 2014년까지의 EL 보급 현황은 철도통계연보⁴⁹⁾를 참고하였으며, 2015년 이후의 보급 대수 전망은 최근 10년간의 자료를 최소자승법으로 확장, 추세하여 2030년 323대로 가정하였다. 이와 같이 계산에 필요한 연도별 평균 연비, 연평균 주행거리 및 보급 대수를 Table 7에 자세히 표시하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 지능형 전력망 5대 분야 적용에 의한 에너지 절감 및 CO₂ 배출 감축량

4.1.1. 지능형 송배전 분야

지능형 송배전 적용에 의한 에너지 절감 및 CO₂ 감축 효과를 Fig. 2에 나타내었다.

이 부분에서의 에너지 절감 원인은 소내전력률에도 영향을 받지만 그 효과는 미미하며 대부분 송배전 손실률 감소에 기인한다. 2016년부터 그 효과가 나타나 234 GWh가 저감될 것으로 추정되고 2030년까지 송배전 손실률 감소는 같은 추세로 이어져 2022년 2,051 GWh, 2030년 5,264 GWh로 절감량이 선형적으로 증가하는 효과를 기대할 수 있다.

Fig. 2. Amount of energy savings and reducible CO₂ emission up to 2030 in Smart Transmission and Distribution (ST&D).

에너지 절감량을 바탕으로 CO₂ 배출 감축량을 산정한 결과 2016년 12만 tCO₂로 추정되고, 2022년 108만 tCO₂, 2030년에는 283만 tCO₂로 예측되었다. 이는 2030년 지능형 전력망을 통해 감축 가능한 CO₂ 전체 배출량인 약 5,538만 tCO₂의 5.11%에 해당하는 값으로 큰 비중을 차지하지는 않지만, 이는 앞서 언급한 대로 국내 송배전 손실률이 이미 세계 최고 수준에 이르러 지능형 전력망으로 인한 송배전 손실을 감소의 폭이 작기 때문으로 판단된다.

4.1.2. 지능형 소비자 분야

지능형 소비자 기술을 적용함으로써 기대할 수 있는 에너지 절감 및 CO₂ 감축량을 Fig. 3에 나타내었다.

2015년까지는 AMI, BEMS 및 FEMS의 보급률이 거의 10% 미만으로 그 효과가 미미하여 2015년 세 가지 기술에 의한 에너지 절감량은 각각 1,748, 1,260, 762 GWh로 총 3,770 GWh로 계산된다. 그러나 2016년 이후부터 보급률이 높아지는데, 특히 AMI의 보급률이 빠르게 증가하여 절감 가능한 에너지양도 가파르게 증가, 2022년 세 가지 기술에서 각각 21,099, 5,873, 3,308 GWh로 총 30,280 GWh가 절감될 것으로 전망된다. 하지만 2022년 AMI 보급률이 100%에 이르고 이후 BEMS와 FEMS 보급률만 증가하므로, 에너지 절감 속도가 감소하여 2030년 세 가지 기술에 의한 에너지 절감량은 각각 25,757, 12,848, 7,154 GWh로 총 45,759 GWh로 추정되며, 이때 세 가지 기술의 기여도 비중은 각각 56%, 28%, 16%로 AMI에 의한 효과가 가장 크다. 이는 AMI의 에너지 절감 가능률이 BEMS에 비해 1/5, FEMS에 비해 1/2이지만 두 기술에 비해 보급률이 높고, 가정, 빌딩 및 공장 등에 설치되어 계산 시 가정, 상업 및 산업 분야의 소비전력량을 사용했기 때문이다.

CO₂ 배출 감축량은 에너지 절감량과 같은 추세로 2015년 AMI, BEMS, FEMS 기술 분야에서 각각 88만, 64만, 39만 tCO₂로 전망되며 2015년 연간 약 191만 tCO₂로 계산되었다. 2022년 세 가지 기술에 의한 CO₂ 감축 효과는 각각 약 1,112만, 310만, 174만 tCO₂로 총 1,596만 tCO₂에 이를 것으로 전망된다. 또한 2030년에는 기술별로 1,383만, 690

Fig. 3. Amount of energy savings and reducible CO₂ emission up to 2030 in Smart Consumer (SC).

만, 384만 tCO₂로 전망되어 연간 약 2,457만 tCO₂감축이 기대된다.

4.1.3. 지능형 전력서비스 분야

Fig. 4에 전력서비스 분야에서 얻을 수 있는 효과를 나타내었다.

우선 2022년도 전력 공급자와 소비자인 가정, 상업, 산업체 간의 직접적인 피드백 기술(또는 DR)을 통해 얻을 수 있는 에너지 절감량은 각각 1,900, 2,609, 6,658 GWh로 총 11,167 GWh로 계산된다. 또한 2030년에는 각각 4,345, 4,126, 11,105 GWh로 직접적인 피드백에 의한 에너지 절감 효과는 총 19,576 GWh로 전망된다. 산업체에서의 직접적인 피드백에 의한 에너지 절감 가능성이 낮음에도 불구하고 두 부분의 절감량을 합한 값보다 큰 이유는 전력 소비량이 나머지 두 분야보다 상대적으로 크기 때문이다.

반면, 2022년 최대전력수요 감소와 커미셔닝에 따라 이 부분에서 각각 353, 292 GWh, 2030년에는 429, 743 GWh가 저감 가능한데 이 값들의 비중은 매우 낮다. 이는 직접적인 피드백을 가능하게 해 줄 장비의 보급률을 높게 가정 한 반면 상대적으로 커미셔닝 보급률을 낮게 설정하였고, 또한 전력서비스 기술 적용에 따라 최대전력수요가 5% 감소된다는 가정(2030년 최대전력수요 감소량, 6,603 MW)에도 불구하고 이에 따른 에너지 절감율이 낮기 때문이다. 결과적으로 지능형 전력서비스 분야에서는 2022년 11,812 GWh, 2030년 20,748 GWh의 에너지가 절감될 것으로 추정된다.

CO₂ 감축 효과는 2015년도에 피드백, 최대전력수요 감소 및 커미셔닝 기술 적용에 따라 각각 47만, 14만, 6만 tCO₂로 총 약 67만 tCO₂로 추정된다. 2022년에는 피드백 장비의 보급률 증가에 따라 피드백에 의한 효과가 급격히 증가하기 시작하여 감축량은 589만 tCO₂이며 최대전력수요 감소 및 커미셔닝 적용에 의한 효과는 각각 19만, 15만 tCO₂로 시간이 지남에 따라 피드백에 의한 기여도는 증가한다. 결국 2030년에는 연간 1,114만 tCO₂의 감축 효과가 발생할 것으로 전망되며, 이 중 직접적인 피드백, 최대전력수요 감소 및 커미셔닝 기술의 기여도는 94%, 2% 및 4%로 각각 1,051만, 23만, 40만 tCO₂이다.

Fig. 4. Amount of energy savings and reducible CO₂ emission up to 2030 in Smart Electricity Service (SES).

Fig. 5. Amount of energy savings and reducible CO₂ emission up to 2030 in Smart Renewable Energy (SRE).

4.1.4. 지능형 신재생 에너지 분야

지능형 신재생 기술을 적용함으로써 기대할 수 있는 에너지 절감 및 CO₂ 감축량과 함께 양수 발전량을 Fig. 5에 나타내었다.

태양광 및 풍력 발전 설비와 발전량이 증가함에 따라 2015년 이후부터 양수 발전량을 초과하여 약 525 GWh가 저감될 것으로 추정된다. 이후 양수 발전량에 비해 태양광 및 풍력 발전량이 급격하게 증가하여 두 가지 신재생에 의한 에너지 절감량은 지속적으로 증가, 2022년 13,735 GWh, 2030년 30,071 GWh로 전망된다. 한편 2022년과 2030년 두 가지 신재생 에너지에 의해 저장되는 양수 발전량은 6,868 GWh 및 9,474 GWh로 계산되었다. CO₂ 배출 감축량은 에너지 절감량과 같은 추세로 2015년 27만 tCO₂, 2022년 724만 tCO₂, 2030년 1,615만 tCO₂에 이를 것으로 전망되며, 이때 태양광과 풍력 발전의 기여 비율은 10:8 정도로 태양광이 다소 크다. 이러한 지능형 신재생 에너지 분야에서의 CO₂ 감축 비중은 2030년 기준 전체 CO₂ 감축량의 29.16%로 지능형 소비자 다음으로 기여도가 크다.

4.1.5. 지능형 운송 분야

지능형 운송 분야에서 얻을 수 있는 효과를 Fig. 6에 나타내었다.

2015년도 이전까지 EV의 누적 보급 대수는 6,000대 미

Fig. 6. Amount of energy savings and reducible CO₂ emission up to 2030 in Smart Transportation (ST).

만으로 그 효과가 미미하여 2.28 GWh가 절감된 것으로 계산된다. 2016년 이후부터 EV의 보급이 빠르게 증가하여 2022년에는 241 GWh, 2030년 1,040 GWh가 절감될 것으로 전망되나 다른 분야에 비해 절감 비중이 작다. 이는 EV 보급 대수가 적은 것이 원인으로 2030년 이후 국가의 계획대로 EV 보급 대수가 크게 증가한다면 빠른 속도로 에너지가 절감될 것으로 예측된다.

EL로의 대체로 인한 에너지 절감 가능량은 2015년 106 GWh, 2022년 167 GWh, 2030년 239 GWh로 절댓값이 다소 증가하나 그 비중은 자동차에 비해 미미한데 이는 EL의 수요 증가 속도가 매우 느리기 때문이다. 결과적으로 지능형 운송 분야에서는 2015년 108 GWh, 2022년 408 GWh, 2030년 1,279 GWh의 에너지 절감 효과가 발생할 것으로 기대된다.

2015년 EV 및 EL로 대체됨에 따라 기대되는 CO₂ 감축량은 각각 0.1만 tCO₂, 5만 tCO₂로 계산되었다. 2022년 두 분야에 의한 CO₂ 감축량은 각각 13만 tCO₂, 9만 tCO₂로 총 22만 tCO₂에 이를 것으로 전망된다. 또한 2030년에는 각각 56만 tCO₂, 13만 tCO₂로 전망되어 총 약 69만 tCO₂ 감축이 기대되며, 이 중 EV와 EL의 기여도는 각각 81%, 19%로 EV에 의한 효과가 크다.

4.2. 지능형 전력망 적용에 의한 전체 효과 분석

지능형 전력망의 5개 분야 기술 모듈을 적용함으로써 기대할 수 있는 에너지 절감 및 CO₂ 배출 감축량을 Fig. 7에 나타내었다.

우선 지능형 전력망 적용에 의해 예측되는 총 에너지 절감량은 2016년 7,695 GWh에서 2022년 58,286 GWh로 가파르게 증가할 것으로 예상된다. 이는 앞서 언급했듯이 총 에너지 절감량의 50% 이상의 비중을 차지하는 지능형 소비자 분야의 결과에 기인한다. 따라서 2022년 AMI의 보급이 완료되면 에너지 절감 속도는 다소 감소하나 여전히 선형적으로 증가하여 2030년 103,121 GWh에 이를 것으로 전망된다. 이 값은 각 연도 소비전력량 전망치의 약 1.5%, 8.9%,

Fig. 7. Total amount of energy savings and reducible CO₂ emission by Smart Grid and contribution of its five sectors up to 2030.

Fig. 8. BAU, greenhouse gases reduction objectives and contribution of Smart Grid to CO₂ emission reductions up to 2030.

13.1%에 해당하는 값으로 지능형 전력망 사업이 계획대로 진행된다면 2025년 연간 소비전력량의 약 10% 이상이 절감 가능하며 그 효과는 점점 증가할 것으로 기대된다. 한편 전체 및 5가지 분야의 CO₂ 배출 감축량은 에너지 절감량과 같은 비율로 증가한다. 이들 값을 바탕으로 Fig. 8에 연간 국가 온실가스 감축 목표 대비 지능형 전력망 운영에 따른 감축 기여도 및 BAU 값을 표시하였다.⁵²⁻⁵⁴⁾

Fig. 7에서와 같이 지능형 전력망에 의해 예상되는 CO₂ 배출 감축량은 2016년 398만 tCO₂, 2022년 3,072만 tCO₂, 2030년 5,538만 tCO₂로 예상된다. 한편 2022년, 2030년 우리나라의 온실가스 감축 목표를 각각 6,800만 tCO₂, 3억 1,500만 tCO₂로 설정하였는데,⁸⁾ 본 논문에서 추정된 값들은 각각 목표량의 45.3%, 17.6%로 상당량 기여할 것으로 기대되나 그 기여도는 해마다 감소한다. 이는 우선 연간 발전량에 따른 CO₂ 배출 속도가 지능형 전력망 운용에 의한 CO₂ 감축 기여 속도보다 훨씬 크기 때문이다. 따라서 실제로 국내 온실가스 배출량의 대부분은 석탄화력 발전에 의

Fig. 9. Contributable composition of five Smart Grid sectors in terms of CO₂ emission reductions in 2030.

한 것으로 석탄에 의한 발전량이 감소하지 않는 한 지능형 전력망에 의한 효과는 한계가 있을 것으로 보인다. 또한 발표된 국가의 목표 배출 감축 속도가 연간 평균 약 3,114만 tCO₂로 매우 빠르기 때문에 이러한 급격한 감축 목표가 가능할지에 대한 의문도 제기되는 상황이다.

2030년 지능형 전력망의 5가지 각 부분 CO₂ 배출 감축량 기여도와 100% 기준으로 각 세부 기술의 상세한 기여도를 Fig. 9에 표시하였다.

AMI 및 BEMS, FEMS 기술을 적용한 지능형 소비자 분야의 기여도가 44.37%로 효과가 가장 크다. 이는 현재 다른 기술에 비해 AMI 기술이 상대적으로 성숙한 단계라는 점을 근거로 2022년까지 AMI의 보급을 100% 완료한다는 정부의 목표를 그대로 적용하고 AMI와 EMS 기술이 가정, 상업 및 산업 분야에서 광범위하게 적용될 수 있다고 가정했기 때문이다. 따라서 계획대로 AMI 보급 사업이 이루어지고 이와 비슷한 속도로 EMS 사업이 수행된다면 에너지 절감량에 가장 큰 기여를 할 것으로 예측된다.

다음으로 신재생 에너지 비중이 29.16%이며 이 중 태양광 효과가 풍력 발전보다 다소 높다. 이러한 신재생 에너지 분야의 기여도는 그 발전량이 CO₂ 감축량과 선형적인 관계가 있기 때문에 발전량을 최대한 증가시키는 게 바람직하다.

지능형 전력서비스 분야는 약 20%의 기여도를 보이고 이 중 소비자의 피드백에 의한 효과가 거의 대부분을 차지한다. 지능형 송배전에서의 효과는 5.11%로 그 효과가 다소 작는데 이는 이미 언급한대로 국내 송배전 손실률은 이미 세계 최고 수준으로 판단되기 때문이다.

마지막으로 지능형 운송 적용에 의한 기여도는 1.24%로 가장 낮다. 이는 EV의 예상되는 보급 대수와 보급 속도가 낮은 게 가장 큰 원인이다. 운송 부문도 신재생 분야와 마찬가지로 보급 대수와 운행 증가가 곧바로 CO₂ 감축 효과로 나타날 수 있기 때문에 기여도를 향상시킬 수 있는 충분한 잠재력이 있다. 또한 실제로 plug-in이 아닌 전력망과 EV 배터리 전원의 직접 연결을 통한 운행 등, 새로운 시스템

개발로 그 효과를 높일 수 있다.

마지막으로 2030년까지 지능형 전력망 5가지 분야의 상대적인 에너지 절감 속도에 대한 결과를 Fig. 10에 표시하였다.

2016년부터 2022년 사이 지능형 소비자에 의한 기여도는 앞서 설명한 이유로 가장 빠른 속도로 증가하고 이후에도 다소 빠른 속도로 기여할 것으로 기대된다. 2030년까지 계산된 신재생 분야에서의 에너지 절감 속도는 소비자 분야보다 다소 더딜 것으로 예측되었지만 2030년까지 상당히 빠른 속도로 증가한다. 이후 지속적인 태양광 및 풍력 발전의 증가와 더불어 마이크로그리드의 보급 및 광범위한 ESS 기술의 향상이 수반된다면 저감 속도는 더욱 상승될 것으로 기대된다. 지능형 전력서비스 분야에서의 기여 속도는 소비자 분야보다는 작지만 2016년과 2022년 기준 변화 추세가 비슷하다. 이는 소비자와 전력서비스 기술이 AMI 및 DR에 의해 유기적인 시스템으로 연결되어있기 때문이다. 지능형 송배전에서의 효과도 다른 부분과 마찬가지로 꾸준히 증가하는 추세를 보이지만 저감 속도는 매우 낮다. 또한 2030년 이후 송배전 손실률 저감에 한계점이 나타날 것으로 예상되어 일정 수준으로 유지되는 상황이 예측된다. 지능형 운송에 대한 저감 속도는 매우 낮다. 따라서 이를 상승시키기 위한 적극적인 보완 방안이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

에너지 절감 및 온실가스 감축을 위한 한 가지 방법으로 지능형 전력망 사업이 추진되고 있다. 본 논문에서는 지능형 전력망에 관한 다양한 자료와 국내 환경에서 설정된 가정 하에 지능형 전력망의 5가지 분야인 지능형 송배전, 소비자, 전력서비스, 신재생 에너지 및 운송 등의 기술이 적용될 경우 연도별 국내 에너지 절감 및 CO₂ 감축 효과와 그 상대적 기여도를 분석하였다. 또한 연도별 전력부문 CO₂ 배출계수를 새롭게 예측하여 계산에 적용하였고 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 에너지원별 발전량의 비중이 해마다 변화함에 따라 연도별 전력 CO₂ 배출계수는 점차 증가할 것으로 계산되었다. 이는 CO₂를 다량으로 배출하는 석탄화력 발전량의 지속적인 비중 증가가 가장 큰 원인이기 때문이다.
- 2) 5가지 지능형 전력망 기술 적용에 의한 총 에너지 절감량은 2016년 7,695 GWh, 2022년 58,286 GWh, 2030년 103,121 GWh로 계산되었고, 이는 각 연도 총 에너지 소비량의 약 1.5%, 8.9%, 13.1%에 해당하며 이 값은 2025년 이후 약 10% 이상으로 유지될 것으로 예측되었다.
- 3) 이때 예상되는 CO₂ 배출 감축량은 2016년 398만 tCO₂, 2022년 3,072만 tCO₂, 2030년 5,538만 tCO₂로 이는 우리나라의 2022년, 2030년 각 감축 목표량의 45.3%, 17.6%로 에너지 절감량과는 다르게 해가 거듭될수록 그 기여도가 감

Fig. 10. Energy saving rate of five Smart Grid sectors up to 2030.

소한다. 이는 CO₂ 배출 감축 측면에서 지능형 전력망의 한 계로 온실가스 배출량의 대부분을 차지하는 석탄화력 발전의 지속적인 증가와 발표된 국가의 목표 배출 감축 속도가 매우 빠르기 때문에 판단된다.

4) 2030년 5가지 각 분야의 CO₂ 배출 감축 기여도는 지능형 소비자 44.37%, 신재생 에너지 29.16%, 전력서비스 20.12%, 송배전 5.11%, 운송 1.24%로 지능형 소비자의 효과가 가장 크며 이는 가정, 상업 및 산업부분에 적용되는 AMI에 의한 효과의 비중이 매우 크게 전망되기 때문이다. 반면, 지능형 송배전과 운송에 의한 효과는 미미할 것으로 예상되나 운송 분야는 신재생 에너지 분야와 함께 기여도 상승 잠재력은 매우 크다.

5) 2030년까지 지능형 전력망 5가지 분야의 상대적인 에너지 절감 속도 중, 2016년부터 2022년 사이 지능형 소비자에 의한 절감 속도가 가장 빠르고 그 다음으로 2016년부터 2030년까지 신재생 에너지 분야의 절감 속도가 빠르다. 전력 서비스는 다소 낮은 속도로 소비자 부분의 추세와 유사하며 지능형 송배전 분야에서의 절감 속도는 송배전 손실률 향상의 한계 때문에 낮다. 또한 EV의 예상되는 보급 대수 증가 속도가 낮아 운송 부분에서 절감 속도가 가장 느리므로 이를 증가시키기 위한 대책이 필요하다.

본격적으로 계획된 지능형 전력망의 구축 시나리오 상 초, 중간시점에 해당하는 현 상황에서 이와 같은 연구 결과를 바탕으로 지능형 전력망 사업이 순조롭게 추진된다면 중장기적으로 국가의 효율적인 에너지 수급 계획 및 절감, 그리고 온실가스 배출 감축에 기여할 수 있으리라 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2017년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2017R1D1A1B030-33107).

KSEE

References

- Kim, S., Chun, J. and Chun, Y., "Study on the Separation of CO₂ from Flue Gas Using Polysulfone Hollow Fiber Membrane," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(2), 147~152 (2014).
- Dong, J. I., "Waste Eco-Energy and GHGs Reduction Technologies in the Era of Climate Change," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **30**(12), 1203~1206(2008).
- Kim, H. S., "Greenhouse Gas Mitigation Policies and National Emission Targets of Korea," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **32**(9), 809~817(2010).
- Kim, J. S., Lee, K. B., Lee, I. H. and Kim, S. D., "Analysis of Energy Consumption Pattern and Greenhouse Gas Emission in the Academic Facility," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **34**(9), 604~612(2012).
- Jeong, Y. J., Li, K. C., Kim, T. O. and Hwang, I. J., "Estimation of Greenhouse Gas Emissions (GHG) Inventory and Reduction Plans for Low Carbon Green Campus in Daegu University," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(7), 506~513 (2014).
- Joongboo Ilbo, <http://www.joongboo.com/?mod=news&act=articleView&idno=1114325>, October(2016).
- Electronic Times Internet, <http://www.etnews.com/2016090300012>, September(2016).
- Ministry of Environment, <https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=534080&menuId=286>, June(2015).
- EPRI (Electronic Power Research Institute), The Green Grid: Energy Savings and Carbon Emissions Reductions Enabled by a Smart Grid, EPRI, USA, pp. 1~11(2008).
- PNNL (Pacific Northwest National Laboratory), The Smart Grid: An Estimation of the Energy and CO₂ Benefits, PNNL, USA, pp. 3~27(2010).
- Digital Daily, http://ddaily.co.kr/m/m_article.html?no=58844, January(2010).
- Sung, J. Y., An Analysis of the Smart Grid Industry Effect on Local Employment, Master Thesis, Seoul National University, pp. 6~21(2013).
- Ministry of Trade, Industry and Energy, http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=78222&bbs_cd_n=81, August(2013).
- MKE (Ministry of Knowledge Economy), Smart Grid National Roadmap, MKE, Korea, pp. 1~69(2010).
- KEEI (Korea Energy Economics Institute), Analysis of Smart Grid Effect on Energy Saving and Green House Gas Reductions, MKE, Korea, pp. 5~6(2010).
- KEEI (Korea Energy Economics Institute), Government's Role for Promoting Competition and Mediating Interests among Smart Grid Market Participants, MKE, Korea, pp. 5~8(2011).
- ERIK (Electrical Industry Research Institution of Korea), Status on the Smart Grid Industry, ERIK, Korea, pp. 4~9(2013).
- Doh, Y. M., Kim, S. J., Hoe, T. W., Park, N. S., Kim, H. H., Hong, S. K., Seo J. H. and Jeon, J. A., "A Trend Analysis of Smart Grid Technology: The Convergence of Electric Power Network and IT Technologies," *ETTRENDS*, **24**(5), 74~86(2009).
- KSGA (Korea Smart Grid Association), Report of AMI Technology Trend in Smart Grid, KSGA, Korea, pp. 9~69(2012).
- Kim, Y. K., Rue, S. M. and Kim, N. K., "Smart Grid Technology Trend and Business Analysis," *KIITM*, **12**(1), 9~17 (2014).
- KEEI (Korea Energy Economics Institute), Plan for EMS Industry Development, KEEI, Korea, pp. 5~90(2013).
- Kim, H. Y., Jeong, J. S., Cha, W. S., Shin, G. S. and Kim, S. T., "Technical Trends of AMI and HEMS for Smart Grid Implementation," *ETTRENDS*, **28**(2), 11~19(2013).
- Jeong, S. J., Lee, S. H. and Kim, S. H., "Effect of Smart Grid on Earth Environment and National Power Industry,"

- in Proceedings of the KIIT Summer Conference*, KIIT, pp. 545~549(2014).
24. Sung, D. K., Song, N. O., Ko, K. S., Cha, J. Y., Bae, K. Y. and Jang, H. S., "Convergence of Power System Technology and Information Communication Technology in Smart Grid," *Commun. KIIE*, **31**(3), 10~21(2013).
25. Cho, H. S., "Energy Management System (EMS) based on Energy Storage System (ESS)," *in Proceedings of the KIEE Autumn Conference*, KIEE, pp. 257~259(2014).
26. Park, C. K., Choi, D. Y. and Kim, H. J., "Analysis of the Impact of Smart Grids on Managing EVs' Electrical Loads," *J. Digital Convergence*, **11**(11), 767~774(2013).
27. KRRI (Korea Railroad Research Institute), Korea Rail Technology: Entry of Railway Industry into Overseas and Smart Grid, KORAIL, Korea, pp. 80~85(2010).
28. KRRI (Korea Railroad Research Institute), Korea Rail Technology: Strategies for Optimum Utilization of Electric Railway Power Energy, KORAIL, Korea, pp. 30~39(2010).
29. Korea Power Exchange, <https://www.kpx.or.kr/www/contents.do?key=222>.
30. Wee, J. H. and Choi, K. S., "CO₂ emission and avoidance in mobile applications," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **14**(2), 814~820(2010).
31. KEEL (Korea Energy Economics Institute), Yearbook of Energy Statistics, KEEL, Korea, pp. 126~177(2015).
32. Cho, B. O., Kim, S. J. and Kim, J. S., "An Analysis on Korean Nuclear Power's Contribution to the GHG Emission Reduction and the Economic Effect," *Korean Soc. Environ. Eng.*, **19**(4), 203~214(2010).
33. KEPCO (Korea Electric Power Corporation), Statistics of Electric Power in Korea, KEPCO, Korea, pp. 16~171(2016).
34. MOTIE (Ministry of Trade, Industry and Energy), The 7th Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand, MOTIE, Korea, pp. 1~97(2015).
35. Korea Electronic Power Corporation, <https://home.kepco.co.kr/kepco/KE/I/htmlView/KEIAHP00103.do?menuCd=FN01020103>.
36. MOTIE (Ministry of Trade, Industry and Energy), Direction of Supply of Smart Meter and Energy Storage System, MOTIE, Korea, pp. 1~12(2013).
37. Electronic Times Internet, <http://www.etnews.com/20141203000300>, December (2014).
38. Ministry of Trade, Industry and Energy, http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=158371&bbs_cd_n=81, July (2016).
39. NIPA (National IT Industry Promotion Agency), Report on the Status of EMS Instruction in 2013, NIPA, Korea, pp. 1~5(2014).
40. DigitalTimes, http://www.dt.co.kr/contents.html?article_no=2014011502019932614005, January(2014).
41. KEA (Korea Energy Agency), New & Renewable Energy Statistics 2014, KEA, Korea, pp. 22~23(2015).
42. KORAIL (Korea Railroad), Statistical Yearbook Railroad, KORAIL, Korea, pp. 1460~1463(2009).
43. KEMCO (Korea Energy Management Corporation), 2013 Vehicle Fuel Economy and CO₂ Emissions: Data and Analysis, KEMCO, Korea, pp. 22~257(2014).
44. KEMCO (Korea Energy Management Corporation), 2015 Vehicle Fuel Economy and CO₂ Emissions: Data and Analysis, KEMCO, Korea, pp. 22~232(2015).
45. MOTIE (Ministry of Trade, Industry and Energy), The 3rd Eco-friendly Vehicle Development and Supply Plan, Korea, pp. 6~15(2015).
46. KRRI (Korea Railroad Research Institute), Calculation of Standard Fuel Consumption via Analysis of Major Railway Parts, KORAIL, Korea, pp. 128~132(2013).
47. Newsprime, <http://www.newsprime.co.kr/news/article.html?no=63852>, September(2008).
48. Korea Transportation Safety Authority, <http://www.ts2020.kr/ind/prt/InqDetNANNewsData.do?bbsCd=203&bbsSn=8161>, December(2015).
49. KORAIL (Korea Railroad), Statistical Yearbook of Railroad, KORAIL, Korea, pp. 10~1082(2015).
50. Ministry of Trade, Industry and Energy, <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=483180&menuId=286>, February(2015).
51. Ministry of Trade, Industry and Energy, <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=601900&menuId=286>, January(2016).
52. Greenhouse Gas Inventory and Research Center, <https://www.gir.go.kr/home/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=36&boardId=33&boardMasterId=2&boardCategoryId=>, December (2015).
53. Korea Government Interagency, GHG Emission Reduction Goals, Korea, pp. 25(2014).
54. NABO (National Assembly Budget Office), Nation's GHG Reduction Target Evaluation for Post-2020 and Analysis of Measures to Secure Overseas Emission Rights), NABO, Korea, p. 66(2016).